



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

Análisis de la sostenibilidad del sistema fotovoltaico instalado en la PUJ Cali

Programa de Maestría en Ingeniería

Presentado por:

Angelica Bonilla Molina
Santiago Charria Lopez

Dirigido por:

PhD. Olga Lucia delgadillo

Pontificia Universidad Javeriana Cali
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Julio de 2025

Análisis de la sostenibilidad del sistema fotovoltaico instalado en la PUJ Cali

A, Bonilla^a. S, Charria^a

^a Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Javeriana, Cali, Colombia

Abstract

This study evaluates the sustainability of the photovoltaic (PV) system installed at Pontificia Universidad Javeriana Cali through a simplified life cycle assessment (LCA) under the strong sustainability framework. The analysis covers the energy and material input required for manufacturing, transport, operation, and end-of-life management of the system's components, focusing on key impact categories such as Energy Payback Time (EPBT), Global Warming Potential (GWP), and Acidification Potential (AP). Results show an EPBT of 4.04 years and an emissions intensity of 35.2 g CO₂-eq/kWh, indicating favorable operational performance. However, the study highlights that significant environmental impacts occur during manufacturing and disposal phases. The analysis underscores the need for circular economy strategies and improved end-of-life management, including mechanical and thermal recycling processes for module materials. The study concludes that although the PV system contributes positively to emission reduction and sustainability education on campus, its long-term viability under strong sustainability requires proactive planning for material recovery, supplier selection, and lifecycle monitoring to minimize ecological trade-offs.

1. Introducción

La cantidad total de la actividad humana es una nueva fuerza geológica en el planeta, debido a que ha sido capaz de alterar la reproducción natural de los ecosistemas hasta el punto de poner en suspenso las condiciones de existencia de los seres vivos, completamente interdependientes en términos ecológicos [1]. En el contexto de la guerra fría, y en un ambiente signado por el temor a una guerra atómica, la idea de transición energética nace a finales de los años setenta del siglo pasado con el propósito de mostrar que era necesario y posible un mundo basado en las energías renovables, es decir, aquellas que se obtienen de fuentes naturales como el sol, el viento, el agua o la biomasa; que se regeneran en forma constante, y que pueden considerarse inagotables a escala humana [2].

El desarrollo de los sistemas fotovoltaicos ha cobrado una relevancia significativa en la

búsqueda de soluciones energéticas sostenibles, alineándose con los esfuerzos globales para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar los impactos ambientales asociados a la generación de energía convencional. En este contexto, la energía solar se posiciona como una de las fuentes renovables más prometedoras, debido a su disponibilidad global y sus beneficios ambientales [3]. Estudios recientes destacan que la capacidad de generación fotovoltaica ha crecido significativamente, y se prevé que para el 2050 ésta represente el 16% de la producción energética mundial [4]. Sin embargo, su implementación plantea desafíos científicos, tecnológicos, económicos, sociales, políticos y culturales que requieren un análisis detallado para evaluar sus impactos y viabilidad a largo plazo bajo las condiciones de consumo energético actuales.

La creciente demanda energética a nivel global es una problemática central en la búsqueda de la sostenibilidad. En las últimas décadas, el consumo energético ha aumentado de manera considerable, debido al crecimiento poblacional, la industrialización y el desarrollo tecnológico; según el Statistical Review of World Energy [5], en el año 1980, en el mundo, se consumieron 88.003 TWh, mientras que en 2023 se consumieron 183.230 TWh lo que representa un aumento de 95.000 TWh en 43 años. Este incremento ha llevado a una mayor explotación de recursos fósiles, contribuyendo al cambio climático y generando preocupaciones sobre la seguridad energética. A pesar de los avances en la diversificación de la matriz energética, las fuentes renovables representan apenas un porcentaje alrededor del 14% según datos de la Agencia Internacional de las Energías Renovables [6]. Para evaluar la sostenibilidad de estas tecnologías es necesario analizar su ciclo de vida completo, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. En este contexto, la sostenibilidad fuerte exige que el uso de recursos no comprometa las capacidades naturales de regeneración, lo que implica considerar no solo la eficiencia energética de un sistema, sino también sus impactos ecológicos, sociales y económicos a lo largo de todo su ciclo de vida.

Aquí surgen tres preguntas que guían este estudio. Por un lado, ¿pueden los sistemas naturales en que se sustenta el metabolismo social ser sustituidos por máquinas o infraestructuras sin considerar las múltiples dimensiones que entran en juego?, ¿estas energías aportan de manera significativa a la transición energética de manera sostenible? y ¿en qué medida el sistema solar fotovoltaico de

la Pontificia Universidad Javeriana (PUJ) Cali contribuye a la sostenibilidad?

Para abordar estos desafíos, diversas soluciones tecnológicas han sido propuestas desde un enfoque multidimensional [7]. No obstante, el impacto de estas tecnologías varía según el contexto geográfico, socioeconómico y regulatorio, lo que hace necesario realizar estudios específicos para evaluar su viabilidad en diferentes escalas y condiciones.

Este estudio tiene como objetivo evaluar la implementación de un sistema fotovoltaico a pequeña escala en un centro educativo, utilizando un análisis de ciclo de vida (ACV) simplificado "de la cuna a la tumba" desde la perspectiva de la sostenibilidad fuerte.

El documento se estructura en dos secciones principales. En primer lugar, se describe la metodología utilizada para el análisis, detallando los criterios y enfoques aplicados. Finalmente, se exponen los resultados del estudio, seguidos de una discusión en el marco de la sostenibilidad fuerte y recomendaciones para futuras instalaciones en contextos similares.

2. Metodología

2.1. ACV

El ACV es un instrumento que permite calcular la huella medioambiental de un determinado producto o sistema. Incorpora todos los aspectos ambientales, biofísicos, sociales y otros impactos relevantes, que se pueden desarrollar a lo largo del ciclo de vida, es decir, desde la extracción de la materia prima hasta el final de su vida útil.

La metodología utilizada se basó en el enfoque del ACV conforme a la norma ISO 14040/44.

Este enfoque se dividió en cuatro fases principales como se representa en la figura 1.

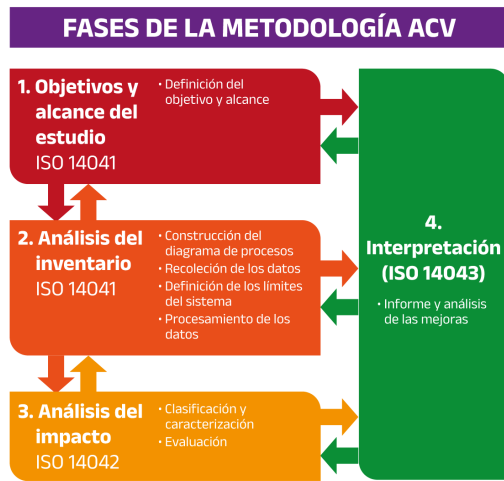


Figura 1. Fases de la metodología ACV. [8]

2.1.1. Objetivo y alcance: Evaluar los impactos de la producción de electricidad del sistema FV instalado en la PUJ Cali, considerando el enfoque de sostenibilidad fuerte. Los límites del sistema incluyen: la producción de módulos fotovoltaicos, inversores, cableado y estructura de soporte; el transporte hasta el sitio de instalación; la operación del sistema; y la disposición final de sus componentes. Dado que el propósito principal del sistema es suministrar electricidad, se elige 1 kWh de electricidad en corriente alterna (CA) como la unidad funcional del estudio.

2.1.2. Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV): se recopiló la información sobre los flujos de energía y materiales requeridos para la fabricación, transporte, instalación y disposición de cada uno de los componentes. La información primaria fue complementada con

literatura científica reciente y bases de datos especializadas.

2.1.3. Evaluación del impacto del ciclo de vida:

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) define la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) como el proceso de identificar, predecir, evaluar y mitigar los efectos biofísicos, sociales y otros impactos relevantes ocasionados por propuestas de desarrollo antes de la toma de decisiones mayores y la realización de compromisos.

Se seleccionaron tres categorías de impacto tales como desempeño energético (EPBT – Energy Pay Back Time), potencial de calentamiento global (GWP) y potencial de acidificación (AP). Los resultados fueron calculados a partir del inventario energético estimado y la composición material de los componentes.

2.1.4. Interpretación: se analizaron los resultados para identificar los principales contribuyentes al impacto ambiental, determinar el EPBT y evaluar la coherencia con el enfoque de sostenibilidad fuerte.

2.2. Sostenibilidad fuerte

La sostenibilidad fuerte es un enfoque que sostiene que el capital natural —como los ecosistemas, la biodiversidad y los recursos no renovables— no puede ser sustituido completamente por capital manufacturado o tecnológico. Este enfoque enfatiza que existen límites biofísicos al crecimiento económico y que ciertos servicios ecológicos son esenciales e insustituibles para el bienestar humano y la estabilidad planetaria.

Según [9], uno de los principales teóricos del concepto, “la sostenibilidad fuerte implica la preservación del capital natural crítico, aquel que proporciona funciones ecológicas fundamentales que no pueden ser replicadas por el ser humano”. En este mismo sentido [10] plantea que la sostenibilidad débil es insuficiente porque permite la destrucción de la naturaleza siempre que haya una compensación económica. En cambio, la sostenibilidad fuerte reconoce que ciertos elementos naturales son insustituibles y deben preservarse, ya que forman parte esencial de los sistemas que sostienen la vida y el bienestar humano.

A diferencia de la sostenibilidad débil, que permite el reemplazo entre tipos de capital, la sostenibilidad fuerte establece que el capital natural debe mantenerse intacto para no comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades.

Este enfoque exige que cualquier evaluación de sostenibilidad considere no solo la eficiencia energética o la reducción de emisiones, sino también el impacto sobre los ecosistemas, los ciclos naturales y la disponibilidad de recursos a largo plazo.

3. Resultados y discusión

3.1. Objetivos y alcance del estudio

Evaluar los impactos de la producción de electricidad del sistema FV instalado en el edificio administrativo de la PUJ Cali, considerando el enfoque de sostenibilidad fuerte.

Los límites del sistema se muestran en la figura 2. Dado que el propósito principal del sistema es suministrar electricidad, se elige 1 kWh de electricidad en corriente alterna (CA) como la unidad funcional del estudio.



Figura 2. Sistema FV edificio administración PUJ Cali

3.2. Análisis del inventario

Se recopiló la información sobre los flujos de energía y materiales requeridos para la fabricación, transporte, instalación y disposición de los principales componentes del sistema FV. La información primaria fue complementada con literatura científica reciente. La figura 3 representa el ciclo de vida para un módulo FV desde la extracción de los materiales para su fabricación hasta su disposición final.

Las especificaciones del sistema presentadas en la tabla 1 fueron obtenidas a partir de datos del proveedor.

La composición de un módulo FV como los instalados en el sistema de estudio se muestra en la figura 4

La fabricación de los módulos implica la conversión de silicio de grado metalúrgico en silicio de grado solar, seguido de la transformación de las obleas en células y finalmente en módulos fotovoltaicos [12]. Uno de los principales componentes de los paneles solares es el vidrio, que representa aproximadamente el 75 % de su peso y puede ser reciclado para su uso en la fabricación de nuevos paneles o en la industria del vidrio en general [13].

3.2.1. Modulo FV

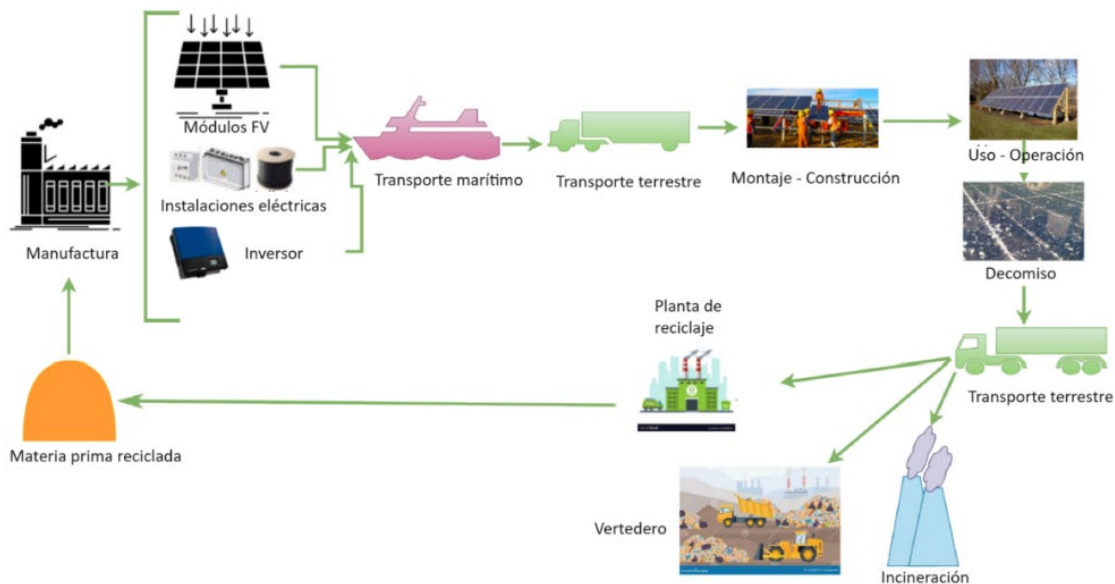


Figura 3. Ciclo de vida de un módulo FV



Figura 4. Composición general de un módulo FV (Adaptado de [11])

Asimismo, el silicio, presente en los módulos fotovoltaicos, puede ser recuperado y reutilizado en la fabricación de nuevas celdas solares o en otras aplicaciones tecnológicas. De acuerdo con [14], la composición de los paneles varía según su tecnología: los módulos de silicio monocristalino y policristalino tienen mayores tasas de reciclabilidad en comparación con los de película delgada, los cuales pueden contener materiales más difíciles de recuperar.

Numerosos estudios han examinado la energía requerida para producir módulos fotovoltaicos solares. Diferentes suposiciones tecnológicas y límites del sistema han dado lugar a una variedad de resultados.

Tabla 1. Inventario del sistema FV de la PUJ Cali

Inventario	
Componente	Especificación
Módulo FV	
Módulo monocristalino	Potencia nominal: 585 Wp
	Eficiencia: 22,5%
	Voltaje circuito abierto: 52,2 V
	Corriente de corto circuito: 14,2 A
	Número de paneles: 60 unidades
	Área total instalada: 155 m ²
	Vida útil: 25 años
BOS	
Marco	Acero 1000 kg
Inversor	Capacidad 30 kW CA
	Numero de inversores 1
	Vida 20 años
Cableado (cobre)	Cantidad 26m

En un estudio realizado por [15] se determinó que la energía necesaria para producir un módulo fotovoltaico está en el orden de 980 kWh/m². En el sistema estudiado se instalaron 60 módulos FV. Los módulos utilizados en este estudio fueron Longi Solar 585 Wp, cada uno con un peso de 27.2 kg y dimensiones de 2278 mm de largo y 1134 mm de ancho. El área cubierta de la instalación es de 155 m². Se hizo un arreglo de 4 cadenas paralelas y 15 en serie.

3.2.2. Componentes del sistema (BOS)

En un sistema solar fotovoltaico, el término BOS (Balance of System) se refiere a todos los componentes del sistema solar, excepto los paneles fotovoltaicos. Entre estos componentes se encuentra el inversor, el montaje y el cableado. Estos elementos son esenciales para el funcionamiento, la instalación y la seguridad del sistema. Detalles del BOS se encuentran en la Tabla 1.

3.3. Análisis del impacto

3.3.1. Desempeño energético (EPBT – Energy Pay Back Time)

El tiempo de retorno energético (EPBT por sus siglas en inglés) de un sistema fotovoltaico solar es el tiempo que tarda un sistema en generar una cantidad de energía equivalente a la necesaria para producir el sistema fotovoltaico [15]. Este puede utilizarse como base para que el sector energético evalúe cada fuente de energía según su EPBT, con el fin de tener una visión a largo plazo y orientar mejor sus estrategias. El EPBT se calcula utilizando la Ecuación (1)

$$EPBT = \frac{E_{mat} + E_{manuf} + E_{trans} + E_{ins} + E_{fin}}{E_{gen} - E_{oper}} \quad (1)$$

Donde:

E_{mat} = Energía demandada (materiales)

E_{manuf} = Energía demandada (manufactura)

E_{trans} = Energía demanda (transporte)

E_{ins} = Energía demandada (instalación)

E_{fin} = Energía demandada (fin de ciclo de vida)

E_{gen} = Energía generada

E_{oper} = Energía demandada (operación)

Con base en los resultados obtenidos por [15] se estima que los requerimientos energéticos son 152,68 MWh para los módulos fotovoltaicos, 28,68 MWh para el marco, 2,00 MWh para el inversor, 0,51 MWh en el transporte y 0,51 MWh en cableado.

El EPBT para el sistema FV del estudio es de 4.04 años. Los resultados coinciden con [16] que reportaron tiempos de retorno energético (EPBT) para sistemas fotovoltaicos modernos que varían entre 3 y 7 años, dependiendo de la tecnología y la ubicación. Otro estudio de [17] destacó que los nuevos módulos de alta eficiencia podrían alcanzar tiempos de retorno energético (EPBT) tan bajos como 2,5 años en condiciones óptimas.

La energía total requerida por el sistema es de 183,86 MWh, de los cuales los componentes con mayor consumo energético son los módulos fotovoltaicos, que representan el 83,0%, el marco del sistema que contribuye con un 15,6% y el inversor con 1,1%.

3.3.2. Potencial de calentamiento global (GWP)

Aunque aparentemente limpios y con impactos ambientales mínimos, los sistemas FV contribuyen a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente durante las etapas de fabricación, transporte e instalación. Estas emisiones provienen de la producción de los módulos fotovoltaicos, los componentes del sistema de balance (BOS), las estructuras de soporte y los cables. No se emiten GEI durante la fase operativa, ya que no hay entrada de materiales o energía en el sistema.

En la tabla 2 se muestran los valores de emisiones de CO₂ equivalentes estimados para los principales componentes del sistema FV instalado en la PUJ con base en resultados reportados por [18.] Al considerar todos los componentes del sistema, el total estimado desde la fuente hasta el uso final es de 40014 g-CO₂eq/kWh.

El sistema de 35.1 kWp instalado en la PUJ se estima que genere aproximadamente 1.13 GWh de energía a lo largo de los 25 años de vida útil, lo que resulta en una intensidad de emisiones de 35.2 g CO₂-eq/kWh.

Un estudio realizado por [19] evidenció que las emisiones de distintos sistemas fotovoltaicos variaron entre 34 y 74 g-CO₂eq/kWh.

Tabla 2. Factor de misiones CO₂ de los componentes del sistema

Componente	Cantidad / Detalle	Factor de emisión estimado (kg CO ₂ -eq./kWp)	Emisiones CO ₂ -eq. (kg)
Módulos FV	60 módulos de 585 Wp (Longi, China)	900	31590
Inversor	1 inversor trifásico	75	2632.5
Estructura soporte	Aluminio/acero para techo plano	60	2106
Cableado y BOS	Cableado, conectores, protecciones	55	1930.5
Transporte	Desde China a Colombia (marítimo + local)	50	1755
Total estimado			40014

3.3.3. Potencial de acidificación (AP)

El AP es un indicador ambiental que mide la capacidad de ciertas emisiones contaminantes para causar acidificación en ecosistemas, como suelos, lagos y cuerpos de agua. La acidificación ocurre cuando compuestos ácidos, principalmente óxidos de azufre (SOx) y óxidos de nitrógeno (NOx), se depositan en el ambiente y reducen el pH del agua o suelo, afectando la biodiversidad y la calidad del ecosistema.

Se realizó una estimación del AP a partir de factores de caracterización disponibles en la literatura científica. Según [20], el AP asociado a sistemas fotovoltaicos en tejados se sitúa alrededor de 3.26×10^{-4} kg SO₂-eq por kWh generado. Con base en la producción anual reportada por el proveedor del sistema, los impactos ambientales anuales estimados para el sistema FV de la PUJ son de 14.8 kg SO₂-eq/año por acidificación.

En la tabla 3 se muestra una comparativa de AP anual para distintas fuentes de generación eléctrica comparada contra la generación anual

del sistema objeto de estudio (45.413 kWh/año).

Comparado con otras fuentes:

El sistema fotovoltaico estudiado tiene un impacto por acidificación mucho menor que el de la red eléctrica o el carbón, aunque ligeramente superior al de la energía eólica, lo cual es aceptable para contextos urbanos donde el reemplazo directo del carbón o diésel es prioritario, consolidando su ventaja ambiental.

3.3.4. Disposición final del módulo FV

La disposición final de los paneles solares al término de su ciclo de vida representa un reto ambiental, tecnológico y logístico que requiere estrategias adecuadas de reciclaje y manejo responsable de residuos. Si bien estos sistemas contribuyen a la generación de energía limpia durante su fase operativa, su fabricación, transporte y disposición generan impactos ambientales que no pueden ser ignorados bajo el enfoque de sostenibilidad fuerte.

Tabla 3. AP anual para distintas fuentes de generación

Fuente de generación	Factor de acidificación (kg SO ₂ -eq/kWh)	Acidificación total (kg SO ₂ -eq/año)	Fuente
Sistema fotovoltaico (PUJ Cali)	0,000326	14,8	[20]
Carbón (bituminoso, promedio)	0,0065	295,18	[21]
Gas natural combinado	0,0011	49,95	[21]
Red eléctrica promedio	0,0022	99,91	[22]
Energía eólica terrestre	0,0002	9,08	[23]
Hidroeléctrica	0,00012	5,45	[23]

[13] y [24] afirman que los módulos fotovoltaicos están compuestos por materiales valorizables como vidrio, aluminio, silicio y cobre, pero también por sustancias potencialmente peligrosas como plomo, etilvinilacetato (EVA), resinas poliméricas y, en algunos casos, elementos tóxicos como cadmio o telurio (presentes en ciertos módulos de película delgada). Además, los inversores y componentes electrónicos contienen metales pesados que requieren una disposición diferenciada para evitar la liberación de contaminantes al ambiente.

Actualmente, en Colombia existen empresas especializadas que gestionan el reciclaje de estos componentes, recuperando materiales como cobre, aluminio y en algunos casos oro, mientras aseguran la disposición segura de residuos peligrosos. Sin embargo, el reciclaje de materiales como la plata, usada en conexiones eléctricas, es más complejo debido a su baja concentración y alto costo de recuperación.

Frente a este panorama, se han identificado dos métodos principales de gestión al final de vida útil:

- **Método mecánico:** Consiste en el desmontaje físico de los módulos, clasificación de materiales y posterior trituración para facilitar la separación de vidrio, metales, polímeros y polvo de silicio. Se aplican técnicas de lixiviación, decantación química, cribado vibratorio y limpieza del vidrio para maximizar la recuperación. Para [13] este enfoque es eficiente para módulos de silicio cristalino, permitiendo recuperar obleas y metales de alto valor energético y económico

- **Método térmico:** Se basa en la aplicación de calor controlado para descomponer el encapsulante (como el EVA) y separar las células solares y el vidrio sin dañarlos. Requiere sistemas de control de emisiones debido a los

gases liberados, pero permite reintegrar materiales purificados al ciclo productivo mediante limpieza química. Es especialmente útil en estrategias de economía circular donde se busca conservar la integridad de los materiales recuperados.

3.4. Interpretación

Se analizan los resultados obtenidos para identificar los principales contribuyentes a los impactos ambientales, evaluar el desempeño energético y la coherencia con el enfoque de sostenibilidad fuerte, y proponer mejoras basadas en los hallazgos.

El inventario energético muestra que la mayor parte de la energía incorporada se centra en la fabricación de los módulos FV, seguida de la estructura de soporte y, en menor medida, inversor y cableado. Los módulos representan aproximadamente el 83 % de la energía total demandada (152,68 MWh), el marco el 15,6 % (28,68 MWh) y el inversor cerca del 1,1 % (2,00 MWh), con transporte y cableado aportando fracciones inferiores (0,51 MWh cada uno). Esta información indica que cualquier estrategia de mejora debe priorizar acciones sobre la fase de fabricación de módulos.

El tiempo de retorno energético calculado de 4,04 años se encuentra dentro del rango reportado para sistemas fotovoltaicos modernos (3–7 años), lo cual confirma que, desde la perspectiva de generación versus energía invertida, el sistema instalado presenta un desempeño favorable. Sin embargo, hay que destacar que este EPBT efectivo depende de la generación real anual y de las condiciones de mantenimiento del sistema. Por lo anterior, mejorar la eficiencia operativa o alargar la vida útil más allá de 25 años acortaría aún más el EPBT real.

La intensidad de emisiones de 35.2 g CO₂-eq/kWh se encuentra en el extremo inferior de

los rangos reportados en la literatura para sistemas FV. Esto confirma que la fase operativa, al no emitir GEI directamente, consolida el beneficio frente a fuentes convencionales. No obstante, la fabricación de módulos y componentes sigue siendo la principal fuente de emisiones asociadas al ciclo de vida completo, por lo que cualquier disminución en esta etapa incide directamente en disminuir la huella total.

El factor de caracterización empleado (3.26×10^{-4} kg SO₂-eq/kWh) refleja un impacto de aproximadamente 14.8 kg SO₂-eq/año. Comparado con fuentes basadas en combustibles fósiles, este valor es bajo, aunque es ligeramente mayor al de la energía eólica. Esto refuerza la ventaja ambiental del sistema FV para reducir la carga de acidificación en la red local, pero sugiere que, en contextos donde se disponga de energía eólica de proximidad, conviene integrar ambas tecnologías.

Desde la perspectiva de sostenibilidad fuerte, la fase de disposición final de los sistemas fotovoltaicos plantea una serie de desafíos que no pueden ser subestimados. Si bien durante su operación estos sistemas ofrecen beneficios ambientales al evitar emisiones asociadas a la generación convencional de energía, su cierre de ciclo involucra flujos materiales que deben ser gestionados bajo criterios estrictos de conservación del capital natural.

La composición de los módulos que combina materiales valorizables y sustancias potencialmente peligrosas, evidencia que los impactos ambientales no desaparecen una vez finaliza su vida útil. La presencia de metales pesados, compuestos poliméricos y elementos tóxicos como el cadmio obliga a contar con esquemas de reciclaje que no solo prioricen la recuperación de materiales estratégicos, sino que aseguren una disposición ambientalmente segura de los residuos no aprovechables. Desde

este punto de vista, la recuperación parcial de metales como el cobre o el aluminio, aunque valiosa, no resuelve por sí sola los desafíos ambientales asociados a la disposición final si no se cuenta con mecanismos que prevengan la pérdida de materiales críticos o la contaminación de ecosistemas.

La existencia de métodos de gestión para el final de la vida útil de estos sistemas FV, como el mecánico y el térmico, representa un avance técnico importante, pero su eficacia depende del acceso a infraestructura especializada y de la capacidad de articular actores del sistema productivo y de gestión de residuos. Además, bajo el enfoque de sostenibilidad fuerte, es clave preguntarse por los impactos indirectos que estas soluciones puedan generar como, por ejemplo, consumo energético adicional, emisiones en procesos térmicos, o generación de subproductos peligrosos.

En este sentido, la implementación de sistemas solares como el evaluado en la PUJ Cali debe considerar desde su etapa de planificación la estrategia para el fin de vida útil de sus componentes, incluyendo acuerdos con gestores autorizados, análisis de circularidad y revisión periódica de las alternativas tecnológicas disponibles para su disposición. Integrar esta dimensión desde el diseño del proyecto podría reducir las externalidades negativas asociadas al cierre de ciclo y fortalecer la coherencia entre la adopción de tecnologías renovables y la conservación efectiva del capital natural, en línea con los principios de una transición energética responsable.

Con base en las etapas identificadas que contribuyen de manera significativa a los impactos ambientales y la visión de sostenibilidad fuerte se proponen las siguientes mejoras.

Fase de fabricación y aprovisionamiento:

- Seleccionar proveedores que utilicen fuentes renovables en sus plantas y que cuenten con certificaciones o ACV propios que demuestren menores emisiones y uso de energía. Según [25], seleccionar un proveedor cuya fabricación de módulos opere con un mix energético 100 % renovable permitiría disminuir el GWP del sistema en cerca de un 23 %.
- Promover el uso de materiales reciclados (marcos, vidrio) o con menor huella incorporada, garantizando calidad y durabilidad.
- Elegir módulos e inversores cuyas piezas puedan separarse y reciclarse con facilidad al final de vida, reduciendo residuos irreversibles.
- Evaluar proveedores regionales o con menor distancia de transporte para reducir emisiones de logística y fortalecer la economía local.

Fase de instalación y operación:

- Ajustar orientación e inclinación de los módulos para optimizar la generación anual real, disminuyendo el EPBT efectivo.
- [26] Sostienen que mejorar la instalación haciendo uso de un sistema predictivo basado en análisis de datos SCADA y algoritmos de machine learning ha demostrado mejorar la producción anual entre un 3 % y un 5 % al optimizar los cronogramas de limpieza y anticipar fallos con antelación. Implementar un programa de mantenimiento con estas características minimiza deterioros prematuros y extiende la vida útil

Fase de fin de ciclo de vida:

- Establecer acuerdos con gestores de residuos y plantas de reciclaje de módulos para asegurar la recuperación de silicio, vidrio y metales.
- Explorar opciones de segunda vida para módulos o inversores con eficiencia reducida, destinándolos a proyectos de menor demanda

- Fomentar una economía circular al canalizar los materiales recuperados de vuelta a la cadena productiva local o nacional, evitando vertederos y reduciendo extracción de recursos vírgenes.

Bajo la óptica de sostenibilidad fuerte, los sistemas naturales en que se sustenta el metabolismo social no pueden ser plenamente sustituidos sin riesgo de desequilibrar los servicios ecosistémicos y comprometer el capital natural crítico. Si bien las infraestructuras (por ejemplo, paneles solares, baterías, redes inteligentes) ofrecen funciones que imitan o amplifican procesos naturales (como captación de energía), todas estas dependen en últimas de recursos extraídos de sistemas naturales (minerales, agua, energía para fabricación) y de la estabilidad de los ecosistemas para su correcto funcionamiento. Además, existen factores no cuantificables mediante indicadores como la resiliencia de paisajes, la complejidad de las interacciones ecológicas o el valor cultural y estético del entorno que simplemente no pueden ser reemplazadas por componentes tecnológicos. En consecuencia, cualquier implantación de infraestructura debe reconocer sus límites biofísicos y su interdependencia con los sistemas naturales, integrando enfoques que preserven aquellos servicios y capitales naturales que no admiten sustitución.

La energía solar fotovoltaica, como otras energías renovables, aporta de forma significativa en la transición energética al reducir la dependencia de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero durante la fase operativa. Sin embargo, su contribución “sostenible” en un enfoque de sostenibilidad fuerte exige evaluar todo el ciclo de vida: extracción de materias primas, energía incorporada en fabricación (EPBT), transporte, operación, mantenimiento y disposición final.

En el estudio, el sistema FV de la PUJ Cali muestra un EPBT de 4,04 años y una intensidad de emisiones de 35,2 g CO₂-eq/kWh, lo cual indica un balance neto positivo respecto a fuentes fósiles. Aun así, a escala global y acumulativa, la multiplicación de instalaciones fotovoltaicas implica una demanda considerable de minerales y metales, presiones sobre cadenas de suministro y generación de residuos al final de vida útil. Para que la energía solar sea sostenible en el sentido fuerte, es indispensable contar con estrategias de diseño para circularidad, diversificación de fuentes y reducción de consumo energético innecesario. Por otro lado, el aporte real depende del contexto: en regiones con infraestructura de reciclaje limitada o sin políticas de economía circular, la expansión acelerada puede ocasionar externalidades negativas. De manera general, las energías renovables aportan significativamente a la transición energética, pero su sostenibilidad plena requiere cerrar ciclos de materiales y considerar impactos más allá de los indicadores convencionales.

El sistema FV del edificio administrativo de la PUJ Cali contribuye a la sostenibilidad en cuanto:

- Genera aproximadamente 1,13 GWh en 25 años con intensidad de 35,2 g CO₂-eq/kWh y EPBT de ~4 años, aporta a la disminución de la huella de carbono institucional frente al uso de fuentes de energía convencionales.
- Su ubicación en un centro académico permite involucrar a estudiantes y personal en el monitoreo, análisis y comprensión de límites biofísicos (cambio climático, acidificación de océanos, uso de agua dulce, etc.) reforzando la cultura de sostenibilidad.
- Aunque el tamaño del sistema es relativamente pequeño comparado con grandes plantas, puede funcionar como demostrador de buenas prácticas en selección

de proveedores, mantenimiento preventivo y diseño modular, que pueden replicarse en otras instalaciones universitarias o comunitarias.

En resumen, el sistema de la PUJ Cali contribuye a la sostenibilidad en la medida en que reduce emisiones y sirve como herramienta pedagógica y de investigación, pero su aporte pleno requiere integrar mecanismos de circularidad que eviten que los beneficios operativos se vean contrarrestados por impactos negativos en la fabricación y disposición final.

4. Conclusión

Los resultados del ACV realizado al sistema FV de 35,1 kWp instalado en la PUJ Cali muestran un balance operativo favorable frente a fuentes convencionales: un EPBT de aproximadamente 4,04 años, una intensidad de emisiones de 35,2 g CO₂-eq/kWh y un potencial de acidificación cercano a 14,8 kg SO₂-eq/año en la escala de la instalación. Estos indicadores confirman que, en fase operativa, la energía solar aporta a la reducción de la huella de carbono institucional y a la disminución de impactos acidificantes respecto a la red eléctrica convencional.

No obstante, bajo el enfoque de sostenibilidad fuerte, estos resultados no deben visualizarse como un permiso sin condiciones. La fabricación de los módulos y componentes, el transporte y la gestión del fin de vida involucran extracciones de recursos no renovables, consumo de energía en procesos industriales y generación de residuos potencialmente peligrosos. En este punto se evidencia que el reciclaje, aunque válido y necesario, es insuficiente si se aplica de manera aislada dentro de un sistema lineal de producción y consumo. La sola recuperación de materiales después de la vida útil, si bien reduce la presión sobre materias primas, no elimina los impactos

asociados a su extracción inicial ni garantiza la reintegración total en cadenas productivas sin pérdidas de calidad o eficiencia.

Además, este estudio presenta varias fuentes de incertidumbre que deben tenerse en cuenta. En primer lugar, la selección de factores de emisión tomados del estudio realizado por [18] y la definición del alcance según la metodología ISO 14044 pueden inducir variaciones en el GWP. En segundo lugar, los datos meteorológicos empleados para estimar la producción anual de energía se basan en datos proporcionados por el proveedor del sistema y no recogen eventos extremos o localizados, lo que podría alterar la generación real. Igualmente, la fase de fin de vida no cuenta con estudios de campo específicos en Colombia, limitando la precisión de la información.

Es imperativo adoptar principios de ingeniería circular desde el diseño y la planificación del proyecto:

- **Ecodiseño de componentes:** elegir tecnologías y materiales con menor huella incorporada y con facilidad de desmontaje y remanufactura.
- **Extensión de vida útil y segunda vida:** implementar estrategias de mantenimiento predictivo, actualizaciones modulares y aprovechamiento en aplicaciones de menor exigencia cuando la eficiencia decaiga.
- **Cadenas de suministro circulares:** gestionar acuerdos con proveedores y gestores de residuos para que aseguren trazabilidad, retornos de materiales y reciclaje de alta eficiencia, evitando vertederos y fugas en los recursos.
- **Monitoreo integral y multidimensional:** además de los indicadores EPBT, GWP y AP, incorporar seguimiento de flujos de materiales al final de vida, consumo energético de procesos de reciclaje, impactos sobre

ecosistemas locales y aspectos sociales (formación, participación, equidad).

- **Dimensión educativa y de investigación:** usar el proyecto como laboratorio para explorar oportunidades tecnológicas, evaluar materiales novedosos y formar estudiantes en capacidades en ingeniería circular.

En síntesis, aunque la instalación fotovoltaica de la PUJ Cali aporta reducciones de emisiones durante su operación y fortalece la cultura de sostenibilidad en el ámbito educativo, su contribución plena a la sostenibilidad fuerte solo se logra si se repiensa el ciclo de vida desde una mirada circular que cierre el ciclo de materiales y energía. Mientras persista un modelo lineal de extracción, uso y descarte, seguiremos enfrentando impactos ambientales críticos. Por tanto, la transición energética debe acompañarse de una transformación profunda de los procesos productivos y de gestión de recursos, promoviendo la ingeniería circular como vector esencial para avanzar hacia sistemas realmente sostenibles.

Referencias:

- [1] M. Arias Maldonado, "Antropoceno", Paradigma: Revista Universitaria de Cultura, vol. 23, pp.16–22, 2020. Disponible en: <https://riuma.uma.es/xmlui/bitstream/handle/10630/19523/16.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [2] B. Fornillo, "Precisar la transición energética: desde el plano energético a la dimensión societal", en Geopolítica de la transición energética. Perspectivas del Sur Global y el caso de Bolivia, pp.88–89, 2024. Disponible en: <https://library.fes.de/pdf-files/bueros/bolivien/21667.pdf>
- [3] N. M. Kumar, A. K. Singh, y K. V. Reddy, "Fossil fuel to solar power: a sustainable technical design for street lighting in Fugar City, Nigeria", Procedia

Computer Science, pp. 956–966, 2016. DOI:[10.1016/j.procs.2016.07.284](https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.07.284)

[4] M. Milousi, M. Souliotis, G. Arampatzis, y S. Papaefthimiou, “Evaluating the environmental performance of solar energy systems through a combined life cycle assessment and cost analysis”, *Sustainability*, vol. 11, no. 9, p. 2539, 2019. DOI:[10.3390/su11092539](https://doi.org/10.3390/su11092539)

[5] Energy Institute, “Statistical Review of World Energy: Primary energy from other renewables,” *Our World in Data*, 2024. Disponible en: <https://ourworldindata.org/grapher/global-energy-substitution>

[6] International Renewable Energy Agency (IRENA), *World Energy Transitions Outlook 2024: 1.5 °C Pathway*, 2024. Disponible: <https://www.irena.org/Publications/2024/Nov/World-Energy-Transitions-Outlook-2024>

[7] C. You, S. I. Khattak, y M. Ahmad, “Impact of innovation in solar photovoltaic energy generation, distribution, or transmission-related technologies on carbon dioxide emissions in China”, *Journal of the Knowledge Economy*, pp. 1–35, 2023. DOI:[10.1007/s13132-023-01284-y](https://doi.org/10.1007/s13132-023-01284-y)

[8] Knauf Industries, “Análisis de ciclo de vida (ACV): qué es y para qué sirve”, 2023. Disponible: <https://knauf-industries.es/analisis-ciclo-vida-acv/>

[9] E. Neumayer, “Weak versus Strong Sustainability: Exploring the Limits of Two Opposing Paradigms”. Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing, 2003. DOI:[10.4337/9781781007082](https://doi.org/10.4337/9781781007082)

[10] M. Ángels Alió, H. Perxacs, y E. Tello, “¿Por qué la crisis ambiental?: contribuciones desde la ecología social”. Barcelona, España: Edicions de la Universitat de Barcelona, 2023. ISBN: 978-84-9168-932-4

[11] AutoSolar Energía de Colombia S.A.S., “Paneles solares monocristalinos”, AutoSolar Colombia, 2025. Disponible: <https://autosolar.co/paneles-solares/paneles-solares-monocristalinos>

[12] S. Malode, R. Prakash, y J. Mohanta, “Sustainability assessment of rooftop solar photovoltaic systems: A case study”, *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 108, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107609>.

[13] W. Bernal, L. E. Martínez, y M. Valencia, “Guía para la disposición de paneles solares al final de su ciclo de vida en Colombia”, Fundación Universidad de América, 2022. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8894>

[14] C. Guzman, “Análisis del impacto ambiental de diferentes tipos de paneles solares según los materiales utilizados y los componentes tóxicos generados”, Fundación Universidad de América, 2017. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.11839/7038>

[15] F. Ullah, K. Hasrat, S. I. Iqbal, S. Kumar, S. Wang, M. Mu, y W. Lu, “Evaluating the global warming potential of a 4.6 kWp solar PV system in Karak-KPK: A life cycle assessment”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 266, 2025. DOI:[10.1016/j.applthermaleng.2025.125790](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125790)

[16] M. B. Whitaker, G. A. Heath, J. J. Burkhardt III, y C. S. Turchi, “Life cycle assessment of a power tower concentrating solar plant and the impacts of key design alternatives”, *Environmental Science & Technology*, vol. 47, no. 11, pp. 5896–5903, 2013. <https://doi.org/10.1021/es400821x>

[17] K. Badza, Y. M. Soro, y M. Sawadogo, “Life cycle assessment of a 33.7 MW solar photovoltaic power plant in the context of a developing country”, *Sustainable Environment Research*,

vol. 33, no. 1, 2023. DOI:[10.1186/s42834-023-00201-x](https://doi.org/10.1186/s42834-023-00201-x)

[18] R. Frischknecht, P. Stolz, L. Krebs, M. de Wild-Scholten, y P. Sinha, “Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems”, IEA PVPS Task 12 Report T12-19:2020, International Energy Agency – Photovoltaic Power Systems Programme, 2020. DOI:[10.13140/RG.2.2.17977.19041](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17977.19041)

[19] R. Zahedi, S. F. Moosavian, y A. Aslani, “Environmental and damage assessment of transparent solar cells compared with first and second generations using the LCA approach”, Energy Science & Engineering, vol. 10, no. 12, 2022. DOI:[10.1002/ese3.1294](https://doi.org/10.1002/ese3.1294)

[20] V. Kouloumpis, A. Kalogerakis, A. Pavlidou, G. Tsinarakis y G. Arampatzis, “Should Photovoltaics Stay at Home? Comparative Life Cycle Environmental Assessment on Roof-Mounted and Ground-Mounted Photovoltaics”, Sustainability, vol. 12, p. 9120, 2020. DOI:[10.3390/su12219120](https://doi.org/10.3390/su12219120)

[21] International Renewable Energy Agency, “Renewable Energy Benefits: Measuring Economics”, IRENA, 2016. Disponible en: <https://www.irena.org/publications/2016> .

[22] International Energy Agency, “Global Energy Review,” IEA, 2021. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021> .

[23] U.S. National Renewable Energy Laboratory, “Life Cycle Assessment Harmonization”, NREL, 2020. Disponible en: <https://www.nrel.gov/analysis/life-cycle-assessment.html> .

[24] J. J. Quiroz, “Transición Energética en Colombia: Impacto socioambiental de los desechos tecnológicos provenientes del uso de la energía solar”, Universidad EAFIT, 2023. Disponible en: <https://repository.eafit.edu.co/server/api/core/b>

[itstreams/047e2c15-255e-41fb-a4dd-50ee15db16f7/content](https://doi.org/10.1186/s42834-023-00201-x)

[25] H. Liang y F. You, “Reshoring silicon photovoltaics manufacturing contributes to decarbonization and climate change mitigation”, Nature Communications, (2023). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36827-z>

[26] A. Al-Humairi, E. Khalis, Z. Al Hemyari, y P. Jung, “Machine Learning-Based Predictive Maintenance for Photovoltaic Systems”, AI, 6-133, (2025). <https://doi.org/10.3390/ai6070133>